УДК 666.974

DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2019.36.8>

Драпалюк М.В.

к.т.н., доцент, доцент кафедри залізобетонних конструкцій і транспортних споруд,
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Пилипенко В.М.

к.т.н., доцент, Академія Державної пенітенціарної служби, м. Чернігів

Педорич А.В.

к.п.н., доцент, Академія Державної пенітенціарної служби, м. Чернігів

Рябченко В.Г.

к.п.н., доцент, Академія Державної пенітенціарної служби, м. Чернігів

Ткаченко І.В.

заступник начальника кафедри, Академія Державної пенітенціарної служби, м. Чернігів

ВПЛИВ СПОСОБУ ФОРМУВАННЯ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ

Анотація. У результаті аналізу ступеня впливу технологічних факторів на процеси формування експлуатаційних властивостей розроблюваного бетону встановлено доцільність застосування технології бетону сухого формування з введенням до складу бетонної суміші демпфуючих компонентів. У статті наведені результати впливу способу формування бетонних конструкцій на структуру бетону і його фізико-механічні характеристики. Визначено шляхи оптимізації структури бетону з метою підвищення тріщиностійкості і довговічності. Механізм гальмування процесів руйнування бетону визначається присутністю в ньому «слабких» пружно-в'язких і шаруватих включень, що знижують локальні напруження і гасять енергію зросту тріщин. Встановлено також, що зниження модуля пружності заповнювача має перебувати в рамках модуля пружності цементної матриці, оскільки значне зниження жорсткості заповнювача призведе до перевантаження цементної складової частини і втрати міцності на стиск бетону. Виконані розрахунки усадкових напружень у процесі твердіння цементно-піщаному розчину за часткової заміни кварцового піску керамзитовим, які мають модуль пружності близько 15000 МПа, показали, що радіальні напруження стиснення і тангенціальні напруження розтягнення знижуються в 2 ... 2,5 рази, радіальні напруження розтягнення (відриву) – в 5 ... 7 разів. Було встановлено, що мінеральні добавки різної природи незалежно від ступеня гідралічної активності оптимізують деформативні властивості цементного каменю і бетону за практично постійної міцності під час стиснення. Також керуючи способами формування залізобетонних конструкцій, можна отримувати конструкції із заданими необхідними параметрами і характеристиками, що в даний час є дуже актуальним.

Ключові слова: бетон, міцність, цементна матриця, демпфуючі компоненти, сухе формування.

Постановка проблеми. Особливістю структури бетону є її висока неоднорідність, зумовлена трьома факторами: пористістю цементної матриці, значною різницею складових частин бетону за пружними характеристиками та міцністю, дефектністю структури бетону на всіх її рівнях [1].

Капілярна пористість у цементній матриці становить 10 ... 40%. Менше значення пористості відповідає цементній матриці бетону нормального твердіння у віці 28 діб при В/Ц відношенні близько 0,2, більше значення при В/Ц близько 0,8. У цьому інтервалі В/Ц міцність на стиск цементної матриці бетону змінюється в межах одного порядку: приблизно від 100 до 15 МПа.

За умови традиційної технології формування збірних бетонних та залізобетонних виробів із водозатвердінних сумішей використовують хімічні добавки, а також попередній розігрів суміші, що дозволяє скоротити індукційний період формування структури цементного гелю, прискорити твердіння бетону, знизити енергоємність виробництва. При цьому найбільший ефект досягається в бетонах з низьким водоцементним відношенням. Реалізація сукупного впливу на бетон попереднього розігріву і введення прискорювачів твердіння за умови звичайної

технології пов'язана з великими труднощами, оскільки при цьому різко знижується легкоукладальність суміші і, як наслідок, зростає пористість, а разом із цим зменшується міцність і довговічність бетону.

Аналіз останніх досліджень. Встановлено, що в залежності від локалізації існує три різновиди початкових тріщин: тріщини контактної шару (названі цими тріщинами зчеплення, становлять 60 ... 70% загальної кількості тріщин у бетоні), тріщини в цементному камені і тріщини в заповнювачі. Було показано, що ініціаторами утворення тріщин в бетоні за одноосового стиску є тріщини, сконцентровані на поверхні розділу «заповнювач – цементно-піщаний розчин».

За одноосового і трьохосового стиску звичайного бетону початкові тріщини утворюються переважно під зернами великого заповнювача ще до навантаження. Це послаблює контактний шар, порушує монолітність, знижує однорідність і міцність бетону в цілому. Із цього випливають причини, що визначають неоднорідність і дефектність самої цементної матриці та контактної шару з наповнювачами, одні і ті ж – наявність у цементній матриці і контактному шарі пор, пустот і початкових тріщин усадкової природи.

Було встановлено, що «неоднорідність бетону, породжуючи виникнення мікротріщин, затримує їх переродження в небезпечні макротріщини, а наявність концентраторів напруги в самій структурі матеріалу робить його малочутливим як до зовнішніх концентраторів, так і до внутрішніх».

Мета дослідження – підвищити міцність і довговічність бетонних і залізобетонних конструкцій, керуючись структурою бетону. Завдання – розробити способи гальмування тріщин і релаксації динамічних напруг у бетоні сухого формування, а також розробити технологію виготовлення виробів із модифікованого бетону сухого формування.

Об'єкти та методи дослідження. Склад і технологія приготування бетонних сумішей визначає міцність та довговічність конструкцій.

Проблема забезпечення довговічності бетонних конструкцій у даний час розглядається з техніко-економічних позицій. Ефективність конструкцій, що експлуатуються в агресивних середовищах, визначається наведеними витратами на виготовлення конструкцій, зведення будівель і споруд, витратами на захист від корозії, ремонт, а також витратами в народному господарстві від простоїв виробництв під час ремонту конструкцій. Висока техніко-економічна ефективність бетонних конструкцій значною мірою визначається їх довговічністю за мінімальних витрат на їх утримання в процесі експлуатації.

Виконання вимог сучасних документів із проектування бетону і конструкцій, призначених для роботи в агресивних середовищах, забезпечує надійність протягом тривалих термінів. При цьому норми встановлюють, виходячи з позицій унеможливлення пошкодження бетону і арматури, вибираючи критичні значення агресивних впливів для бетону певного виду таким чином, щоб не допустити його пошкодження.

Основним механізмом, що встановлює поширення тріщин у бетоні на щільному заповнювачі, є порушення зчеплення на поверхні розділу «цементний камінь – заповнювач». Ця область зазвичай слабкіша за розчинну частину і є місцем виникнення мікротріщин у результаті водовідділення і усадки. За умови низької міцності зчеплення, а також порушеного зчеплення зазначена поверхня є зоною, де з'являються і звідки розвиваються тріщини, що порушують зчеплення заповнювача із цементним каменем і визначають характер загального руйнування бетону [2].

Наукові результати. Слабкість контактної шару визначається седиментаційними процесами у свіжоукладеному бетоні і розвитком у ньому усадкових тріщин під час твердіння. Спочатку в результаті внутрішнього водовідділення вода накопичується під зернами заповнювача, в результаті чого утворюються порожнечі, які частково або повністю заповнені водою. У процесі твердіння бетону дефектність контактної шару посилюється за рахунок виникнення усадкових напруг і, як наслідок цього, розвитку тріщин усадкової природи, локалізованих в основному на межах розділу фаз із різними твердостями. У той же час дефекти в цементному камені і зернах заповнювача можуть, по-перше, служити причиною концентрації напруг та сприяти виникненню тріщин; по-друге, можуть припиняти їх поширення. Було відмічено, що під час стиснення пори в бетоні перешкоджають поширенню тріщин більшою мірою, ніж під час розтягування.

У результаті аналізу ступеня впливу технологічних факторів на процеси формування експлуатаційних властивостей розроблюваного бетону встановлена доцільність застосування технології бетону сухого форму-

вання з введенням до складу бетонної суміші демпфуючих компонентів.

Суть методу сухого формування полягає в тому, що суху бетонну суміш ущільнюють у формі або опалубці і після цього насичують водою. Витрата компонентів розраховуються таким чином, щоб забезпечити мінімальну пустотність і знизити кількість води у насиченні суміші. Оскільки сухі суміші мають укладатися під час вібрації, то можливо застосовувати досить однорідні дрібнозернисті суміші, що характеризуються оптимальною з точки зору фізико-хімічної механіки і теорії твердого тіла структурою [3].

За умови правильно підбраного гранулометричного складу наповнювачів можливе одержання бетонів дуже високої щільності, міцності і морозостійкості. Встановлено, що кількість води, поглиненої сухою сумішшю, залежить від складу і якості ущільнення суміші і може становити величину, відповідну $V/C = 0,15 \dots 0,2$. Також встановлено, що процес водонасичення можна значно інтенсифікувати, а оскільки під час сухого формування взаємодія цементу з водою починається після формування суміші, тобто у виробі, то терміни схоплювання цементу не мають значення і можна застосовувати швидкотвердіючі в'язучі або особливо ефективні прискорювачі схоплювання.

Щільні заповнювачі важкого бетону, в т.ч. кварцовий пісок, не володіють ідеальною сумісністю із цементною матрицею в силу своєї жорсткості (модуль пружності в межах 40000 ... 70700 МПа), що призводить до значних усадкових напруг у процесі твердіння і, як результат, появи і розвитку тріщин.

Виконані розрахунки усадкових напруг у процесі твердіння цементно-піщаного розчину під час часткової заміни кварцового піску керамзитовим, які мають модуль пружності близько 15000 МПа, показали, що радіальні напруги стиснення і тангенціальні напруги розтягнення знижуються в 2 ... 2,5 рази, радіальні напруги розтягнення (відриву) – в 5 ... 7 разів.

Розрахунок усадкових напруг (табл. 1) виконаний із урахуванням результатів досліджень лінійної усадки і модуля пружності цементної матриці бетону, що твердіє з $V/C = 0,35$.

Таблиця 1. Розрахунок радіальних усадкових напруг на кордоні сферичного включення

Модуль пружності включення, МПа	Модуль пружності цементної матриці, МПа	Середня лінійна деформація усадки цементної матриці	Радіальні усадкові напруги, МПа
У віці 28 діб			
8000	15·10 ³	12,5·10 ⁻⁴	10,2
53860			24,6
У віці 90 діб			
8000	16,5·10 ³	20,1·10 ⁻⁴	18,4
53860			42,7

Примітка: модулі пружності включення відповідають модулям пружності керамзитового і кварцового пісків

Слід зазначити, що зниження модуля пружності заповнювача має перебувати в рамках модуля пружності цементної матриці, оскільки значне зниження жорсткості заповнювача призведе до перевантаження цементної складової частини та втрати міцності під час стискання.

У зв'язку із цим можна визначити такі шляхи оптимізації структури бетону з метою підвищення тріщиностійкості та довговічності:

1. Зниження жорсткості наповнювачів бетону за рахунок використання щільних заповнювачів середньої жорсткості (типу вапнякового щебеню) і легких наповнювачів (шлакової пемзи, керамзиту).

2. Зниження концентрації щільних заповнювачів за рахунок розсунення зерен крупного заповнювача цементно-піщаним розчином і дрібного – цементним каменем.

3. Підвищення міцності зчеплення заповнювача із цементним каменем за рахунок підвищення чистоти і жорсткості поверхні щільних заповнювачів, а також застосування пористих заповнювачів.

Під час дії на бетон зовнішнього навантаження рівномірно розподілені в ньому повітряні пори і включення з низькою жорсткістю здатні гальмувати розвиток тріщин і перерозподіляти локальні напруження у структурі бетону серед її елементів із різною пружністю. Характерно, що для бетонів із високим насиченням маложорсткими компонентами міцність контактної зони досить велика, а початкові дефекти контактної зони практично відсутні. Якщо жорсткість (модуль пружності) включення буде більшою або дорівнюватиме жорсткості цементної матриці, то початкові тріщини будуть розвиватися у цементній матриці, оскільки включення у цьому випадку сприймають частину зовнішнього навантаження. У разі коли модуль пружності включення буде менше, ніж у цементної матриці, зростання тріщин буде відбуватися в напрямку слабконапруженої області, тобто в напрямку маложорстких включень. І чим «слабкіше» включення, тим інтенсивніше протікає цей процес.

Процес заповнення форми бетонною сумішшю визначається трьома групами факторів: складом суміші, зокрема властивостями компонентів і їх співвідношенням; параметрами технологічних впливів, наприклад, інтенсивністю вібрації, величиною тиску привантаження, застосуванням вакуумування; відповідністю обраних параметрів технологічних впливів прийнятим складам суміші.

Механізм гальмування процесів руйнування бетону визначається присутністю в ньому «слабких» пружно-в'язких і шаруватих включень, що знижують локальні напруження і гасять енергію зросту тріщин. До подібних шаруватих включень відносяться гідросилікати і гідроксид кальцію, а також добавки полімерів і вспученого вермикуліту, названі «демпфуючими». Крім того, в'язкими каталізаторами крихкого руйнування бетону є замкнуті повітряні пори, які, з одного боку, знижують ефективний перетин матеріалу, з іншого – здатні перерозподілити локальні напруження в бетоні серед його компонентів із різною пружністю.

Відмінними ознаками демпфуючих добавок є їхні знижені жорсткісні характеристики, які визначаються високою пористістю матеріалу. Введення в бетон таких добавок, що знижують концентрацію напружень на межі розділу фаз із різними пружними характеристиками, істотно зменшує розмах коливань і межі змін максимальної та мінімальної деформації і напруження у процесі руйнування бетону.

Механізм дії демпфуючих добавок полягає в тому, що на шляху зростаючої тріщини виникає енергетичний гаситель у вигляді мікровключення. Таке включення не здатне віддавати отриману енергію, витрачену на його деформування. Тим самим зменшується енергія зростання тріщини і релаксуються напруження в її вершині. Наявність у структурі бетону пружно-в'язких включень – низькомодульної добавки демпфуючої дії як релаксатора внутрішніх напружень і енергетичних гасителів тріщин – забезпечує підвищення міцності, тріщиностійкості і морозостійкості бетону.

Підсумувати сказане можна словами А.А. Гвоздева, який зазначив, що «неоднорідність бетону, породжуючи виникнення мікротріщин, затримує їх переродження в небезпечні макротріщини, а наявність концентраторів напруження в самій структурі матеріалу робить його малочутливим як до зовнішніх концентраторів, так і до внутрішніх» [4].

Таким чином, можна констатувати, що мінеральні добавки різної природи незалежно від ступеня гідралічної активності оптимізують деформативні властивості цементного каменю і бетону за практично постійної міцності під час стиснення. Мабуть, це відбувається завдяки зниженій жорсткості мінеральних добавок.

Висновки. Виходячи із загальних принципів регулювання структурно-механічної неоднорідності цементної матриці бетону, позитивний вплив демпфуючих компонентів на структуру бетону і його фізико-механічні характеристики визначається трьома факторами: на стадії структуроутворення – зниженням усадкових напружень, у т.ч. найбільш небезпечних напружень відриву на кордоні «заповнювач – цементна матриця» і напружень, що розтягують у цементній матриці; під час навантаження, заморожування і відтавання – вирівнюванням напружень у структурі бетону і перерозподілом їх серед складових частин бетону з різним модулем пружності; гальмуванням зростання і гасіння тріщин. Встановлено також, що зниження модуля пружності заповнювача має перебувати в рамках модуля пружності цементної матриці, оскільки значне зниження жорсткості заповнювача призведе до перевантаження цементної складової частини і втрати міцності під час стиснення бетону. Також керуючи способами формування залізобетонних конструкцій, можна отримувати конструкції з заданими необхідними параметрами і характеристиками, що в даний час є дуже актуальним.

Література

1. Драпалюк М.В. Дослідження ресурсозберігаючої технології модифікованого бетону з демпфуючими компонентами. *Нові технології в будівництві*. Київ. № 30, 2016. С. 50–53.
2. Соломатов В.И. Элементы общей теории композитных строительных материалов. *Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура*. 1980. № 8. С. 61–70.
3. Де Бур Я. Введение в молекулярную физику и термодинамику. Москва : Издательский центр «ИЗДАТЕЛЬСТВО ФИЗИКА», 1982. 277 с.
4. Гвоздев А.А. Прочность, структурные изменения и деформации бетона. *НИИЖБ Госстроя СССР*. Москва : Стройиздат, 1987. 299 с.
5. Лифшиц Е.М. Теория молекулярных сил притяжения между твердыми телами. *ЖЭТФ*. 1955. Т. 29. Вып. 1. С. 94–110.
6. Полак А.Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ. Москва : Стройиздат, 1966. 208 с.
7. Muller H. Die Theorie der Koagulation polydisperser Systeme. *Kolloid. Z.* 1926. Bd. 38. S. 1–2.
8. Ахвердов И.Н., Маргулис Л.Н. Неразрушающий контроль качества бетона по электропроводности. Минск : Наука и техника, 1975. 174 с.
9. Bruh G., Vacuum – Concrete – Verfahren – Maschinen – Geräte – und Personaleinat/ (Zement und Beton), 1967, V., 339, S. 11–12.
10. Файнер М.И. Ресурсосберегающая модификация бетона. Черновцы : Прут, 1993. 151 с.

References

1. Drapaluk M., Pulupenko (2016). Research of resource-saving technology of modified concrete with dipping components // New technologies in construction, No. 30.50-53.
2. Solomatov V.I. (1980) Elements of the General Theory of Composite Building Materials. Izv. Universities. Construction and architecture. - №8, 61-70.
3. De Bur Ya. (1982). Introduction to molecular physics and thermodynamics. - M.: Publishing house, 277.
4. Gvozdyev A.A. Strength, structural changes and deformations of concrete / A.A. Gvozdyev // NIIZHB Gosstroy USSR. - M.: stroiizdat. - 1987. - 299 s.
5. Livshic E. (1955) / The theory of molecular forces of attraction between solids // JETP, - T. 29. Вып. 1, 94-110.
6. Polak F. (1966). Hardening of monomineral astringents. - Stroyizdat, 208.
7. Muller H. (1926) Die Theorie der koagulation polydispenser Systeme. // Kolloid. - Z. Bd. 38, 1-2.
8. Ahverdov I. (1975). Nondestructive quality control of concrete by conductivity: Science and Technology, 174.
9. Brux G., Vacuum (1967). Concrete – Verfahren – Maschinen, - Geräte – und Personaleinat / - (Zement und Beton), V., 339, 11-12.
10. Fainer M. (1993). Resource-saving modification of concrete. The Prut, 151.

INFLUENCE OF THE METHOD OF FORMING CONCRETE STRUCTURES ON PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Abstract. As a result of the analysis of the degree of influence of technological factors on the processes of forming the performance properties of the developed concrete, the expediency of applying the technology of concrete of dry molding with the introduction into the composition of the concrete mixture of damping components is established. Complex influence of biological and hygrometric factors leads to intensive destruction of concrete. The grid of cracks grows continuously under certain conditions, sometimes reaching 10 ... 20 cm/day. It is characteristic that the development of crack formation occurs not only over the surface, but also in depth. The nature of the damage caused is determined by the operating conditions in which the concrete is exposed. The mechanism of inhibition of the processes of destruction of concrete is determined by the presence of "weak" elastic-viscous and layered inclusions in it, which reduce local stresses and quench the energy of crack growth. The solution of the problem bioavailability of concrete is an important task for modern construction. Calculations of shrink stresses during the hardening of cement-sand mortar with partial replacement of quartz sand with expanded clay, which have an elastic modulus of about 15,000 MPa, showed that the radial compressive stresses and tangential tensile stresses decrease by 2 ... 2.5 times, radial tensile stresses (separation) – 5 ... 7 times. To make correct and justified engineering solutions the preservation and restoration of operational characteristics and to increase the durability of concrete structures for special purposes, the most important and at the same time the most difficult is the problem of determining the weak links in the structure of the facility, establishing their mutual influence with different levels of structure and identifying causal relationships with various types of structural damage.

Key words: concrete, microcracks, crack resistance, biological resistance of the material, bactericidal active surface.

Drapaluk M.V.

PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities, Odessa State Academy of Construction and Architecture, Odessa

Pylypenko V.M.

PhD in Engineering, Associate Professor, Academy of the State Penitentiary Service, Chernihiv

Pedorych A.V.

PhD in Pedagogical Sciences, Associate professor, Academy of the State Penitentiary Service, Chernihiv

Riabchenko V.H.

PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Academy of the State Penitentiary Service, Chernihiv

Tkachenko I.V.

Deputy Head of the Department, Academy of the State Penitentiary Service, Chernihiv